

# **REZUMAT SINTETIC**

## **AL ACTIVITĂȚII DEPUSE ÎN CADRUL**

### **PROIECTULUI PD NR. 83 / 2013 – ETAPELE I și II – 2013 ÷ 2014**

A New On-Chip Magnetically-Actuated Mobile Microrobotic Agent and Embedded Control System

Sistem inovant microrobotic mobil cu control magnetic imbarcat

Director proiect: Dragomir Florin / Mentor: Ivan Ioan Alexandru

Prezentul rezumat înglobează realizările și rezultatele specifice prezentate succint din cadrul primei și a celei de-a doua etape a proiectului. Toate activitățile aferente etapelor au urmărit în primă instanță obiectivele propuse privind studii teoretice asupra structurilor microrobotice mobile, urmate de cele referitoare la proiectarea și realizarea practică a unei structuri microrobotice originale.

În cadrul proiectului, într-o primă parte am studiat abordările existente relativ la proiectarea și respectiv la metodele de acționare și control a microroboților, iar în a doua parte am realizat studii experimentale și teoretice cu privire la proiectarea, simularea și dezvoltarea microrobotului.

#### **1. Studii teoretice asupra structurilor microrobotice mobile**

##### **1.1. Principiile de funcționare ale microroboticii**

Având în vedere progresele recente în domeniul științei și tehnologiei la nivel micro/ nano și a cererii tot mai mari de noi sisteme micrometrice pentru aplicații în medicină sau biotehnologie, crearea de microroboți mobili, care ar putea accesa spații mici, până la scara de microni, cum ar fi în interiorul corpului uman și ar putea manipula sau interacționa cu alte entități micro / nano, a devenit o problemă critică.

Dominiul microroboticii a cunoscut progrese enorme în ultimii ani. Principiile de proiectare a microroboților se bazează pe o înțelegere a fizicii la scară micro, precum și pe fabricarea și strategia de control a acestora.

În literatura de specialitate nu există o definiție standardizată a termenului de microrobot ; intalnim două abordări, și anume : o abordare în care termenul de microrobot se referă la dimensiunile foarte mici ale robotului, iar o altă abordare în care termenul de microrobot se referă la spațiile mici în care robotul poate executa anumite operații. Însă este unanim acceptat că atunci când facem referire la acest termen se înțelege un robot de dimensiuni foarte mici (începând de la câteva sute de nanometri până la un milimetru).

O altă definiție a microroboticii se referă la metodele de locomoție ale robotului. Mișcarea microroboților este în strânsă corelație cu mediul extern, acesta fiind direct influențat de forțele și efectele fizice de la nivelul microscopic (ex: suprafața de deplasare, forțele de frecare, aderența, etc.). Cele mai mari probleme și totodată și provocări, apar în proiectarea și controlul microroboților.

Dimensiunile diferite ale roboților miniaturizați, ale mini și microroboților sunt determinate de diferitele lor aplicații și implică tehnologii de realizare, metode de măsurare, control și de asamblare diferite. Din punct de vedere tehnologic este dificil de delimitat o tipologie specifică mini și microroboților, totuși se pot identifica două clase distincte:

a) microroboții de tip clasic, la care arhitectura este cea a roboților industriali și a manipuletoarelor, fiind obținută prin miniaturizarea sau integrarea elementelor componente. Performanțele lor funcționale depind nemijlocit de progresele tehnologice în direcția miniaturizării senzorilor și actuatorilor.

b) microroboții neconvenționali, ce se bazează pe principii fizice particulare (piezoelectricitate, magnetostrictiune, memoria formei, electrorologie). Aceștia utilizează proprietățile mecanice, electrice sau magnetice ale așa-numitelor materiale 'inteligente', ceea ce permite, în final, realizarea unor funcții specifice roboților de tip clasic. Cel mai adesea se obține o

mobilitate ce determină deplasarea întregului sistem sau a unei părți a acestuia pe suprafața unui solid, în mediu lichid sau în aer.

## 1.2. Posibilitățile de microfabricație

Datorită faptului ca tehnicile tradiționale de fabricare a roboților nu pot fi extinse la scară micrometrică, pentru fabricarea microroboților sunt utilizate metode de microfabricație. Astfel, microrobotii sunt realizați în principal folosind metodele de microprelucrare, inclusiv fotolitografie, depunere de material, depunere electrolitică (electroplating), și microturnare (micromolding).

Părțile componente ale microroboților sunt asamblate cu ajutorul auto-asamblărilor robotizate sau cu ajutorul aparatelor de precizie de micro-montaj. Tehnicile utilizate depind de funcționalitatea necesară și se realizează cu materiale speciale, necesare pentru acționare magnetică, și componente de proiectare specifice.

Pentru fabricarea unui microrobot, de obicei, pe o placheta de siliciu sunt proiectate zeci, sute sau mii de piese microrobotice. Limitările ale acestei tehnici sunt că acestea sunt doar forme plane 2D, iar materialele disponibile pentru un anumit proces sunt limitate și relative scumpe. Această tehnică poate fi împărțită în două părți, o primă parte numită "Wafer-Level Processes", și o a doua parte numită "Pattern Transfer" [1].

### 1. Wafer-Level Processes

Procesul la nivelul plachetei include curățarea și depunerea de materiale. Particulele de depunere, prin energia și natura lor, au o mare influență asupra structurii, compoziției și compactității depunerii. În funcție de destinația funcțională a stratului depus, în procesul de depunere se controlează: timpul de depunere, grosimea, rezistența electrică, sau un alt parametru. Clasificarea metodelor de depunere a straturilor subțiri în vid, des utilizată în literatura de specialitate, cuprinde două grupe de metode:

- metode fizice de depunere din faza de vapori (PVD – Physical Vapour Deposition).
- metode chimice de depunere din faza de vapori (CVD – Chemical Vapour Deposition).

Pornind de la starea de agregare a materialului de depunere și de la procesele fizice și chimice de generare, de transport și de nucleație a depunerii, metodele fizice, chimice și fizico-chimice de depunere a straturilor subțiri în vid se pot clasifica în patru tipuri de baza, din care deriva o multitudine de variante.

1. Metoda evaporării termice și condensării din stare de vapori, este metoda în care particulele de depunere sub forma de vapori, neutre din punct de vedere electric și cu o energie de 0,1...0,3 eV, sunt obținute prin evaporarea în vid a materialului de depunere, aflat în stare solidă.

2. Metoda pulverizării (sputtering) este metoda de depunere a straturilor subțiri în vid, în care materialul de depunere sub forma de atomi neutri sau grupări de atomi neutri, cu energii cuprinse între 10 eV și 40 eV, este obținut prin pulverizarea în vid a materialului de depunere, aflat în stare solidă.

3. Metoda placării ionice este metoda de depunere, în care particulele materialului de baza pentru creșterea stratului, obținute prin evaporare termică sau pulverizare în vid, sau particulele materialului secundar de depunere, moleculele gazului reactiv, sunt în mare parte ionizate printr-un anumit procedeu (traversare a unei zone cu plasma sau bombardarea cu electroni). Gradul de ionizare al particulelor de depunere, după datele culese din literatura de specialitate, variază obișnuit între 0,5% și 30%.

Gradul de ionizare al materialului de depunere influențează direct coeficientul de activare energetică al substratului (și aderența materialului depus) precum și structura (dimensiunea cristalitelor), compactitatea și compoziția stratului depus.

4. Metoda depunerii chimice a vaporilor la presiune scazuta este o metoda de depunere a straturilor subtiri in vid, in care materialul de depunere, aflat la temperatura inalta sub forma de vapori, reactioneaza cu substratul incalzit si se depune selectiv pe aceasta.

## 2. Pattern Transfer

Această metodă presupune transferarea unui desen reprezentat pe un șablon pe suprafața plăchetei de siliciu.

Tehnica folosită în cadrul acestei metode este tehnica litografiei. Tehnica litografiei oferă posibilitatea localizării pe plăcheta de siliciu a operațiilor de: oxidare, dopare, metalizare, urmărind zone bine definite pe suprafețe mici. Atunci când transferul imaginii de pe șablon spre plăchetă are loc cu ajutorul luminii procesul poartă numele de fotolitografie.

Procedeele fotolitografice au la bază reacțiile fotochimice în diferite amestecuri de substanțe organice care sub acțiunea radiației sunt supuse unor procese de activare. Activarea cu ajutorul radiațiilor are un caracter selectiv. În cazul radiației optice, cuantele luminoase sensibilizează numai anumite molecule din soluția de fotorezist, lăsând intacte celelalte molecule.

Etapile procesului fotolitografic pentru definirea unor "ferestre" pe suprafața plăchetei semiconductoare sunt (Figura 1): curățirea și degresarea substratului; depunerea stratului de fotorezist pe suprafața plăchetei oxidate; uscarea fotorezistului; poziționarea fotosablonului (masca) și expunerea la radiație UV; dezvoltarea stratului de fotorezist; corodarea chimică a stratului de oxid ( $\text{SiO}_2$ ); îndepărtarea stratului de fotorezist; curatarea plăchetei de siliciu.

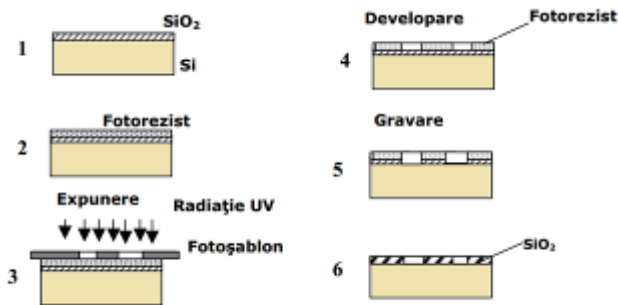


Figura 1. Principalele etape ale unui proces fotolitografic

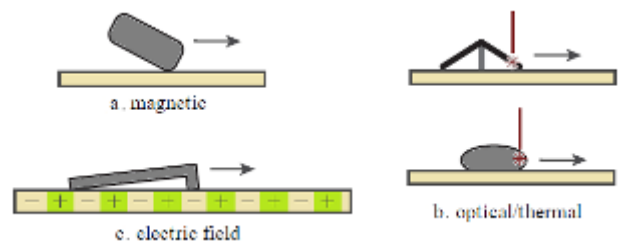


Figura 2. Moduri de acționare a microroboților

Abordările existente în legătură cu proiectarea și controlul deplasării microroboților sunt (Figura 2):

a. microroboți acționați magnetic, aici putem aminti de Mag- $\mu$ Bot [2], microrobotul Mag-Mite [3], microrobotul "the magnetic microtransporter" [4], microrobotul "rolling magnetic microrobot" [5], microrobotul "the diamagnetically-levitating mm-scale" [6], microrobotul "the self-assembled surface swimmer" [7], și de microrobotul "the magnetic thin-film" [8].

b. microroboți acționați termic, aici putem aminti microrobotul "the laser-activated crawling" [9], microrobotul "light sailboat" [10], și microrobotul "the optically controlled bubble" [11].

c. microroboți acționați electric, aici putem aminti microrobotul "the electrostatic scratch-drive" [12] și de microrobotul "the electrostatic microbiorobot" [13].

d. microroboți acționați cu ajutorul efectului piezoelectric-magnetic, și anume microrobotul MagPieR [14] și microrobotul "the electrowetting droplet" [15].

## 2. Studii experimentale si teoretice cu privire la proiectarea, simularea si dezvoltarea microrobotului

### 2.1 Simulari in element finit (campuri, dinamica)

Ideea de baza a acestui proiect este de a propune, dimensiona și realiza un microrobot original cu performanțe compatibile sau chiar superioare cu ceea ce există în acest domeniu la ora actuală [14].

În vederea realizării microrobotului propus în cadrul acestui proiect, au fost efectuate diverse studii, calcule și simulări. Rezultatul simulărilor în Comsol este prezentat succint mai jos. El are în vedere calcularea campurilor magnetice create de sistemul de piste conductoare; dimensiunile și numărul pistelor, vor determina, împreună cu valorile curenților ce le străbat, valorile campului magnetic necesar deplasării agentului microrobotic.

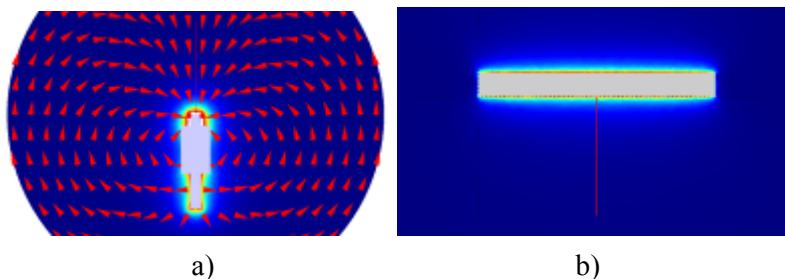


Figura 3. a) Simulare în element finit a câmpului magnetic creat de o bobină macroscopică pentru aplicații microrobotice [14] și b) Simulare în element finit a câmpului magnetic creat în jurul unei piste conductoare

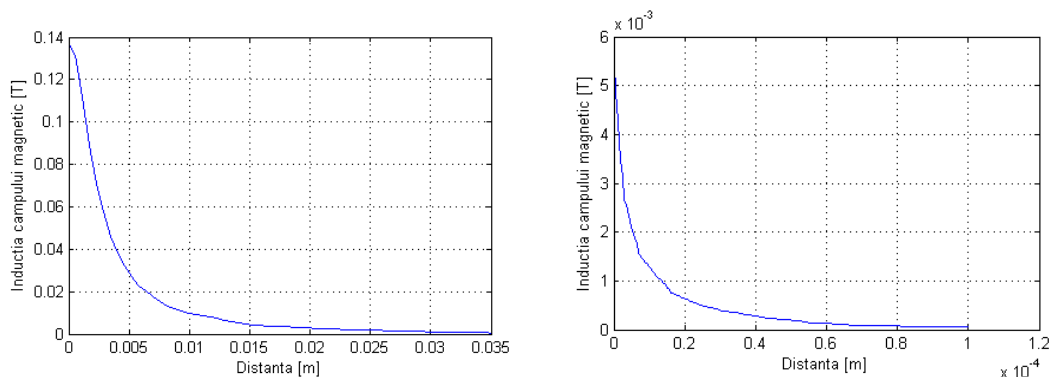


Figura 4. a) Simularea câmpului magnetic la bobina macroscopică [14] și b) Simularea câmpului magnetic creat în jurul unei piste conductoare, pentru aplicația de față.

O etapă importantă a proiectului a constat în estimarea șanselor de reușită a acționării magnetice propuse, date fiind constrângerile dimensionale și implicit de disipație electrică. Pentru validare, am efectuat studii comparative cu bobina realizată macroscopică din [14] care a acționat cu succes agenți microrobotici până la distanțe de circa 1 cm. Densitatea de câmp magnetic a fost estimată pentru puterea nominală de disipație a celor doua dispozitive. Deși pentru Figura 4.a constatăm o inducție magnetică semnificativ superioară celei generate de pista metalică Figura 4.b, se constată o îmbunătățire a câmpului magnetic în termeni de gradient magnetic (mărimea care asigură acționarea propriu-zisă) cu un factor de circa 5X. Date fiind distanțele mult mai mici de acționare pentru soluția propusă, gradientul simulat de câmp magnetic este cuprins între 10 și 50 T/m față de bobina [14] care prezintă un interval de 2 T/m pana la 7 T/m. Acest fapt reprezintă un rezultat încurajator, sub rezerva incertitudinilor legate de următoarele etape tehnologice (rezistența de contact a pistelor electrice, rugozitatea interfetei agent-arenă).

## 2.2 Proiectarea structurii microrobotului (descrierea funcțională a microrobotului propus)

Proiectarea microrobotului precum și realizarea lui au fost concepute pentru structura mobilă propriu-zisă și separat, pentru suportul pe care ea se va deplasa.

Pentru realizarea structurii mobile, având dimensiuni micrometrice ( $400\ \mu\text{m} \times 400\ \mu\text{m}$ ), se pornește de la un substrat izolant pe care se va defini un „pattern” cu ajutorul unor etape de fotolitografiere și al unei „măști”, utilă pentru transferarea patternului pe substratul dorit. Maska necesară a fost concepută în mediul de dezvoltare LayoutEditor

Etape tehnologice au permis întocmirea următoarei diagrame (flow-chart) de derulare a proceselor tehnologice:

1. Pregătirea preliminară a substratului (lamela de sticlă) în vederea utilizării în procesul de microfabricație, curățirea lui;
2. Depunerea unui strat subțire de metal, Cu/Cr prin pulverizare catodică pe substratul izolant;
3. Depunerea unui strat gros de rășină fotosensibilă (fotorezist) prin „spray coating”, expunerea acestuia la radiații UV, în vederea structurării stratului de Cu/Cr, urmată de dezvoltarea rășinii și analiza la microscop;
4. Depunerea unui strat gros de nichel electrolitic și analiza acestuia la microscop, după care înlăturarea rășinii și decuparea agenților prin tăiere.

## 2.3 Proiectarea spațiului de lucru (arena)

Dimensionarea spațiului de lucru a fost făcută în raport cu cea a agentului microrobotic. Au fost prevăzute și structuri cu dimensiuni mai mari (un factor 2X), pentru a evita probleme de eșec de ordin tehnologic.

Principalele etape tehnologice necesare realizării structurii arenei pentru microrobotul prezentat în paragraful anterior sunt sintetizate mai jos:

1. Pregătirea preliminară a substratului în vederea utilizării lui în procesul de microfabricație;
2. Depunerea unui strat subțire de metal, Au/Cr, prin pulverizare catodică pe substratul izolant, urmată de depunerea unui strat de rășină fotosensibilă prin centrifugare și expunerea acestuia la radiații UV, în vederea structurării stratului de Au/Cr; dezvoltarea rășinii și analiza la microscop.
3. Depunerea unui strat de izolator peste stratul metalic, este vorba de oxidul de siliciu, care va fi peste stratul metalic anterior; depunerea unui strat de fotorezist prin centrifugare, strat necesar structurării oxidului. Dezvoltarea rășinii și analiza la microscop; Înlăturarea rășinii și curățarea substratului. Depunerea unei rășini fotosensibile inversibile prin centrifugare, în vederea realizării un lift-off metalic, expunerea în UV, dezvoltarea și analiza sub microscop.
4. Depunerea celui de al doilea strat conductor de Au/Cr peste stratul de oxid de siliciu, prin pulverizare catodică, în vederea obținerii celui de al doilea etaj de piste metalice. Structurarea rășinii prin lift-off („stripping” în băi de acetona), urmată de gravura umedă a stratului metalic și înlăturarea stratului de fotorezist. Depunerea unui strat de fotorezist final, de protecție, prin centrifugare. Decuparea arenelor prin tăiere și lipirea firelor de conexiune;

Pentru structurarea straturilor metalice și a celui de oxid, au fost folosite trei măști, proiectate în mediul de dezvoltare LayoutEditor și care, după suprapunere, arată ca în imaginea din Figura 5:

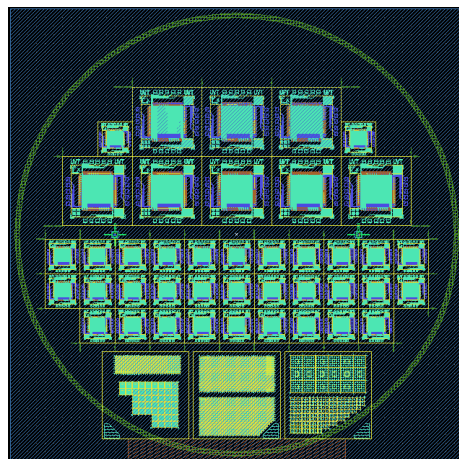


Figura 5. Măștile nr. 1, 2, 3 și 4 suprapuse

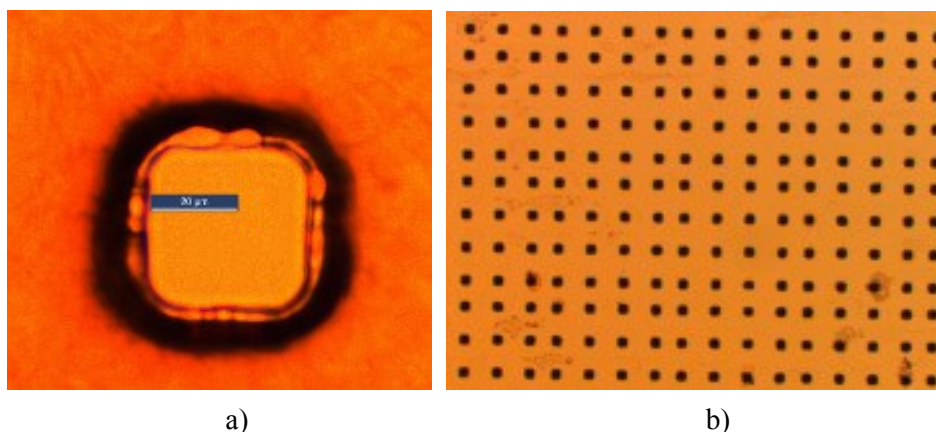
## 2.4 Dezvoltarea microrobotului și a unui spațiu de lucru bi-dimensional format din piste conductoare (arena)

### 2.4.1 Realizarea microrobotului. Etapele de microfabricație ale structurii microrobotului

Etapele tehnologice au fost derulate în ”sala albă” a Institutului Femto-st din Besancon, Franța. În vederea fabricării structurii microrobotului, au fost parcurși următorii pași :

1. Fabricarea măștii nr.1;
2. Metalizarea substratului de sticlă cu crom și cupru;
3. Depunerea rășinii AZ9560 în strat de 20  $\mu\text{m}$  prin spray coating;
4. Depunerea de nichel electrolitic;
5. Înlăturarea rășinii și de decupare a structurilor individuale din Nichel, care vor face obiectul de microrobot, folosind mașina de tăiere de structuri micro a institutului MIMENTO.

Fotografiile de mai jos ilustrează rezultate ale diferitelor etape:



a)

b)

Figura 6. Imagini obținute cu microscopul, a) motivele în rășină după etapa de fotolitogravură (vedere în detaliu), b) motivele realizate în nichel deșus electrolitic (vedere cu placa în ansamblu)

Au fost decupate mai multe serii de microroboți individuali, având periodicități diferite și prin urmare mai multe dimensiuni. În Figura 7 sunt prezentate câteva din aceste eșantioane înainte și după decupare:



Figura 7. Imagini cu structura pentru microrobot înainte de decupare (a) și după decupare (b)

#### 2.4.2 Realizarea spațiului de lucru (arenei). Etapele de microfabricație ale spațiului de lucru pentru microrobot

Procesul de microfabricație al spațiului de lucru a început cu fabricarea celor 3 măști. Apoi s-a realizat depunerea primului strat, urmată de depunerea stratului de oxid de siliciu și structurarea lui. După fiecare etapă au fost efectuate măsurători la profilometru și sub microscop.

Fotografiile de mai jos realizate sub microscop, arată diferite stadii din procesele derulate.

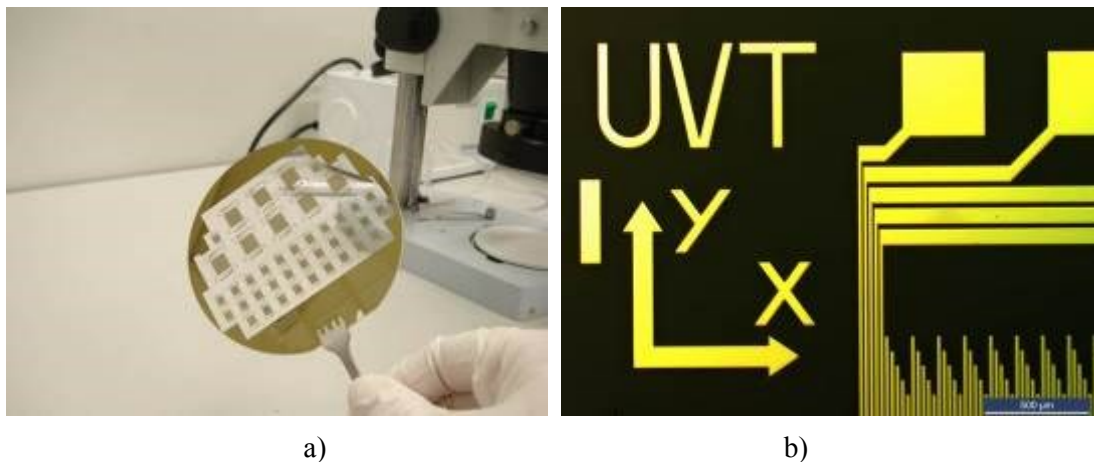


Figura 8. Imagini ilustrând realizarea primului strat metalic (de interior): a) waferul întreg, b) detaliu la microscop

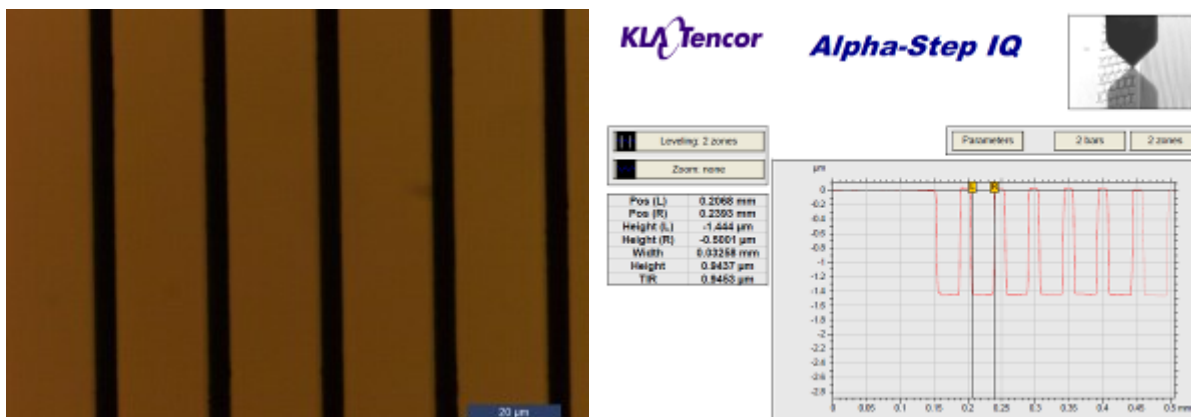


Figura 9. a) Imagine ilustrând detalii cu primul rând de piste din Cr/Au; b) Imagine ilustrând caracterizarea la profilometru a primului strat metalic

În prima fază a acestei activități s-a realizat nivelul 1 de piste metalice pe 2 waferi de sticlă. Pentru aceasta, a fost necesară configurarea unui prim strat de rășină fotosensibilă, după cum se observă în Figura 10.

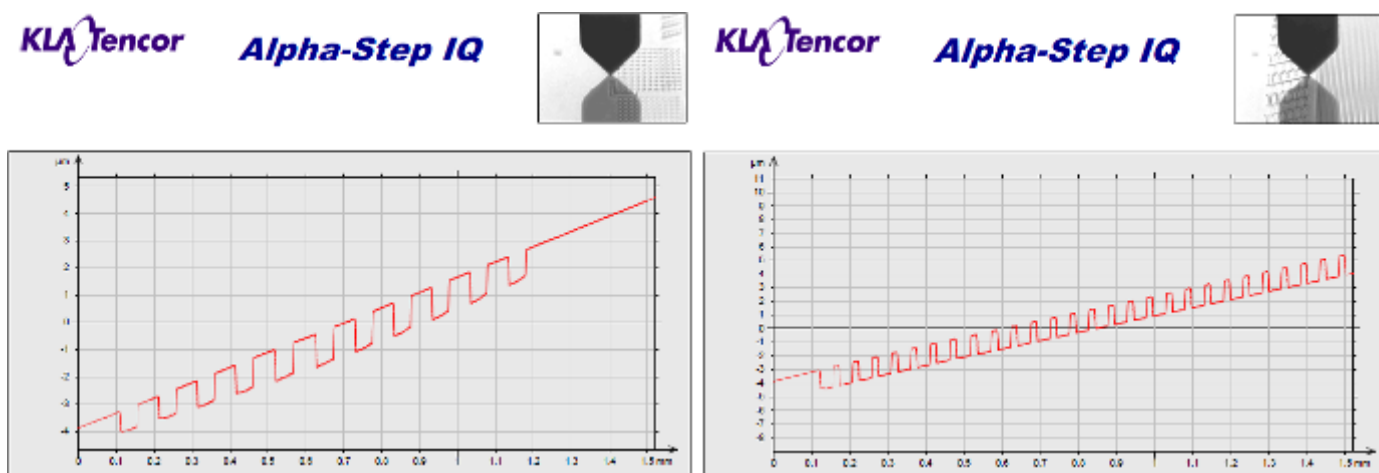


Figura 10. Imagini la profilometru ilustrând diferite motive din primul strat de rășină fotosensibilă structurat în vederea depunerii primului nivel metalic

Structura multistrat poate fi observată din imaginile obținute la profilometru cu ocazia măsurării grosimilor pentru diferite straturi și la nivelul diferitelor motive existente pe plachetă (Figura 12).

Grosimea de oxid a fost măsurată după etapele de atac umed HF și înlăturare a rășinii, prin elipsometrie, pe zone de wafer unde există numai motive din siliciu.



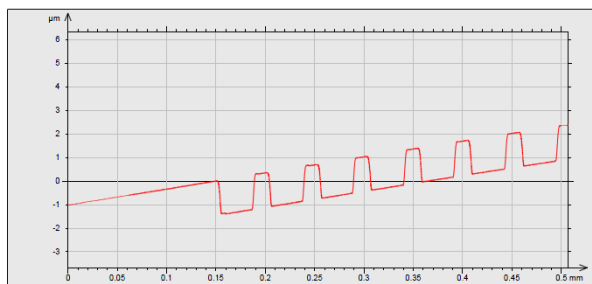
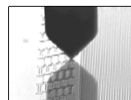


Figura 11. Imagine la profilometru ilustrând motive din primul strat metalic

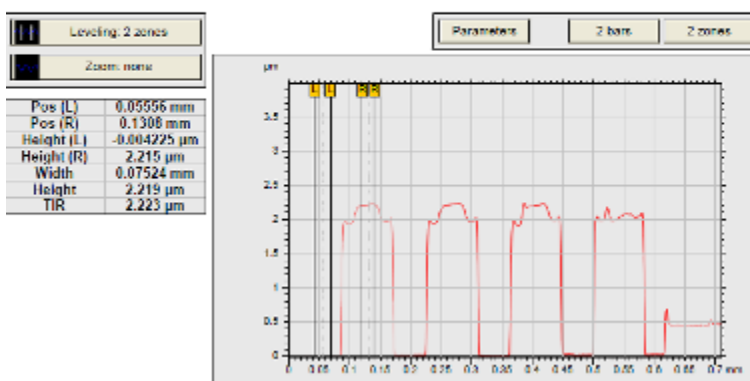


Figura 12. Imagine la profilometru ilustrând suprapunerea diferitelor straturi :metalul, oxidul și rășina

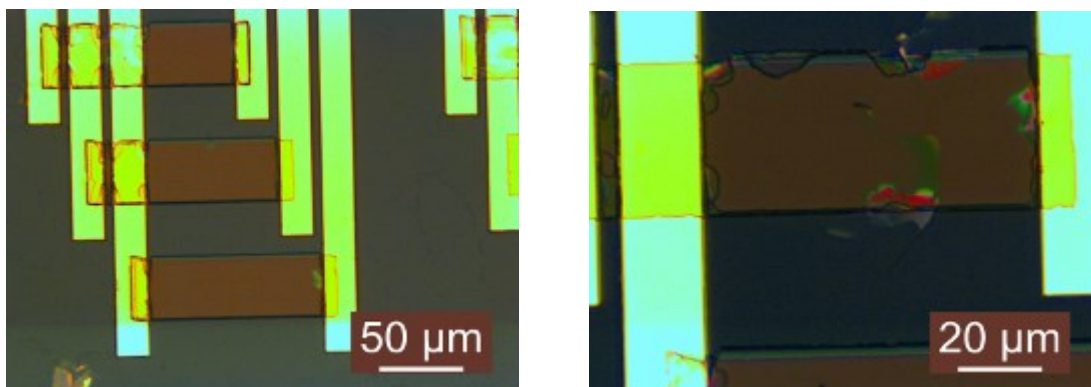
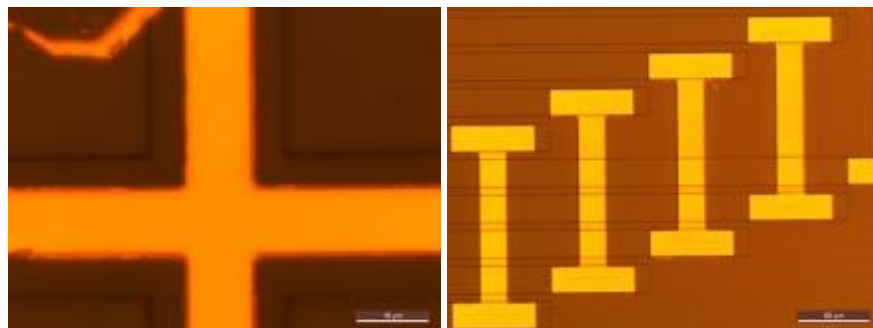


Figura 13. Imagini la microscop ilustrând straturile de oxid depuse pe motivele din aur

Pentru etapa următoare, care constă în formarea celui de al doilea rând de piste metalice, grosimea stratului de metal trebuie să acopere «pragul» format de aceste 2 straturi de oxid de siliciu.

Alinierea perfectă a motivelor de pe diferitele staturi depuse este în cazul nostru un punct cheie în reușita procesului de fabricație.

Acest lucru se urmărește în mod special la nivelul semnelor de aliniere, în cazul nostru fiind în formă de cruce, dar și la nivelul altor motive existente pe wafer (Figura 14).



**Figura 14. Imagini la microscop indicând alinierea diferitelor motive din rășina (transparente la culoare) cu cele existente deja pe plachetă**

În acest mod, s-a ajuns cu o primă serie de structuri pentru arena microrobotului în etapa finală, cu rezerva că pot exista anumite probleme de contact electric sau scurt-circuit datorită imperfecțiunilor legate de problemele apărute la nivelul oxidului. Se pot astfel realiza primele teste și măsurări experimentale.

## **2.5. Cablarea și microasamblarea arenei**

Etapele derulate în cadrul activității de cablare și microasamblare a arenei au fost:

1. Cablarea arenei - realizarea conectării cablurilor de conexiune cu terminalele arenei.



**Figura 15. Imagini la microscop cu cablurile de Cu**

Conectarea cablurilor de conexiune la terminalele arenei se poate face prin lipire prin procedeul de polimerizare, adică după poziționarea cablurilor cu adeziv bicomponent pe bază de argint EPO-TEK H22 la terminalele arenei, acesta trebuie ținut într-un cuptor electric la temperaturi de  $80^{\circ}\text{C} \div 100^{\circ}\text{C}$  aproximativ  $40 \div 45$  minute (în cazul nostru am ținut arena împreună cu cablurile de Cu în cuptorul electric 45 minute la o temperatură de  $80^{\circ}\text{C}$  (Figura 16)). După aceea arena a fost scoasă din cuptor și lăsată să se răcească, lipitura fiind încă sensibilă la acțiuni mecanice până ce se usucă. Cablurile folosite sunt din cupru cu diametrul  $\Phi = 0,15$  mm.

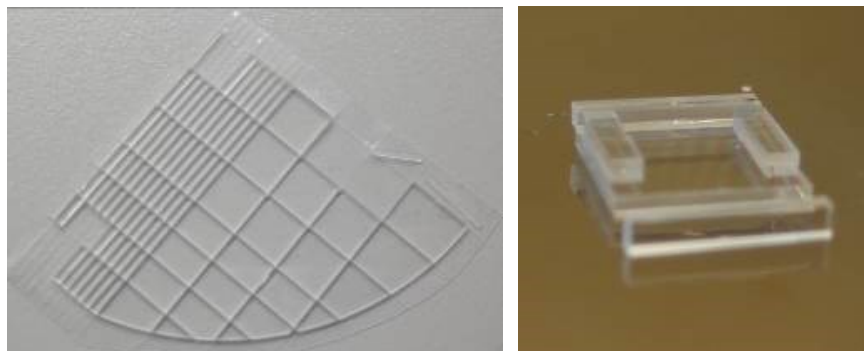


**Figura 16. Polimerizarea cablării dintre cablurile de Cu și terminalele arenei**

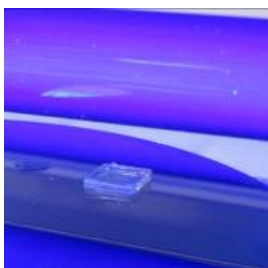
## 2. Obținerea capacului și asamblarea lui

Capacul arenei (Figura 17) a fost realizat din sticlă decupată după dimensiunile dorite, dintr-un wafer de diametru 3" și grosime de 500nm, tăierea realizându-se cu ajutorul unei mașini cu disc diamantat micrometric, cu comanda automată.

Formarea capacului s-a realizat prin lipirea componentelor utilizând adezivul "Noland UV Curing Optical Adhesives", iar pentru întărirea lipiturii capacul creat a fost pus aproximativ 15 minute la raze UV (Figura 18). Adezivul folosit pentru lipirea sticlei realizează o lipitură rigidă și transparentă (Figura 19).



**Figura 17. Plachetele din sticlă utilizate pentru obținerea capului arenei**



**Figura 18. Depunerea la raze UV a capacului**



**Figura 19. Imaginea finală a capacului**

## 3. Microasamblarea arenei.

Pentru asamblarea arenei primul pas este poziționarea agentului pe suprafața de lucru

După poziționarea agentului se va poziționa și capacul pe suprafața de lucru, obținându-se astfel microasamblarea arenei

## Bibliografie selectivă

- [1] S. Senturia, *Microsystem Design*. Springer, 2000.
- [2] C. Pawashe, S. Floyd, and M. Sitti, “Modeling and experimental characterization of an untethered magnetic micro-robot,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 28, no. 8, pp. 1077–1094, 2009.
- [3] D. R. Frutiger, K. Vollmers, B. E. Kratochvil, and B. J. Nelson, “Small, fast, and under control: Wireless resonant magnetic micro-agents,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 29, no. 5, pp. 613–636, November 2009.
- [4] M. S. Sakar and E. B. Steager, “Wireless manipulation of single cells using magnetic microtransporters,” in *International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2668–2673, 2011.
- [5] G.-L. Jiang, Y.-H. Guu, C.-N. Lu, P.-K. Li, H.-M. Shen, L.-S. Lee, J. A. Yeh, and M. T.-K. Hou, “Development of rolling magnetic microrobots,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 20, no. 8, p. 085042, August 2010.
- [6] R. Pelrine, A. Wong-Foy, B. McCoy, D. Holeman, R. Mahoney, G. Myers, J. Herson, and T. Low, “Diamagnetically levitated robots: An approach to massively parallel robotic systems with unusual motion properties,” in *International Conference on Robotics and Automation*, pp. 739–744, 2012.
- [7] A. Snezhko and I. S. Aranson, “Magnetic manipulation of self-assembled colloidal asters,” *Nature Materials*, vol. 10, pp. 1–6, August 2011.
- [8] W. Jing, X. Chen, S. Lyttle, and Z. Fu, “A magnetic thin film microrobot with two operating modes,” in *International Conference on Robotics and Automation*, pp. 96–101, 2011.
- [9] O. Sul, M. Falvo, R. Taylor, S. Washburn, and R. Superfine, “Thermally actuated untethered impact-driven locomotive microdevices,” *Applied Physics Letters*, vol. 89, p. 203512, 2006.
- [10] A. Buzas, L. Kelemen, A. Mathesz, L. Oroszi, G. Vizsnyiczai, T. Vicsek, and P. Ormos, “Light sailboats: Laser driven autonomous microrobots,” *Applied Physics Letters*, vol. 101, no. 4, p. 041111, 2012.
- [11] W. Hu, K. S. Ishii, and A. T. Ohta, “Micro-assembly using optically controlled bubble microrobots,” *Applied Physics Letters*, vol. 99, no. 9, p. 094103, 2011.
- [12] B. R. Donald, C. G. Levey, and I. Paprotny, “Planar microassembly by parallel actuation of MEMS microrobots,” *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 17, no. 4, pp. 789–808, 2008.
- [13] M. S. Sakar, E. B. Steager, D. H. Kim, A. A. Julius, M. Kim, V. Kumar, and G. J. Pappas, “Modeling, control and experimental characterization of microbiorobots,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 30, no. 6, pp. 647–658, January 2011.
- [14] A.I. Ivan, G. Hwang, J. Agnus, M. Rakotondrabe, N. Chaillet, and S. Régnier. “First experiments on MagPieR: a planar wireless magnetic and piezoelectric microrobot,” in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 102–108, 2011.
- [15] E. Schaler, M. Tellers, A. Gerratt, I. Penskiy, and S. Bergbreiter, “Toward fluidic microrobots using electrowetting,” *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3461–3466, May 2012.

Director proiect,  
Florin DRAGOMIR